

(4.4) Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

α) Μαγνητική ροή

Έστω το ομογενές μαγνητικό πεδίο του σχήματος έντασης B (Εικ. 49). Μέσα σ' αυτό και κάθετα στις δυναμικές γραμμές θεωρούμε μια επιφάνεια που έχει εμβαδόν S .

Το γινόμενο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου επί το εμβαδόν S της επιφάνειας ορίζεται σαν ένα νέο φυσικό μέγεθος που ονομάζουμε ροή και συμβολίζεται με Φ , δηλαδή:

$$\Phi = BS \quad (7)$$

Η μονάδα της μαγνητικής ροής ονομάζεται Weber, συμβολίζεται με Wb και προκύπτει από το γινόμενο της μονάδας της έντασης του μαγνητικού πεδίου επί τη μονάδα της επιφάνειας, δηλαδή:

$$1Wb = 1Tm^2$$

Ξέρουμε ότι η ένταση B του μαγνητικού πεδίου μας δίνει την πυκνότητα των δυναμικών γραμμών, δηλαδή τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνούν ανά μονάδα επιφάνειας. Άρα η μαγνητική ροή, το γινόμενο δηλαδή BS , εκφράζει τον ολικό αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνάνε από μία επιφάνεια S .

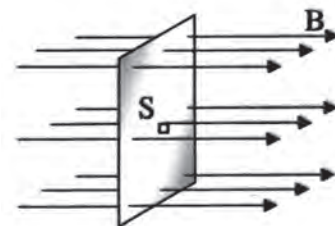
Αν η επιφάνεια S τοποθετηθεί πλάγια στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τότε η μαγνητική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = BS\sigma\alpha \quad (8)$$

όπου α είναι η γωνία που σχηματίζει η κάθετη στην επιφάνεια με την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Όταν $\alpha = 0^\circ$ έχουμε $\sigma\alpha = 1$ και $\Phi_{\max} = BS$. Όταν $\alpha = 90^\circ$ έχουμε $\sigma\alpha = 0$ και $\Phi_{\min} = 0$. Αυτό θα συμβεί όταν ο αγωγός είναι παράλληλος στις δυναμικές, οπότε καμία δυναμική γραμμή δεν διέρχεται από την επιφάνεια.

Αν μέσα σε κάποιο μαγνητικό πεδίο βάλουμε μια κλειστή επιφάνεια η ολική ροή που θα περνά μέσα από αυτή θα είναι μηδέν. Αυτό είναι φανερό επειδή όσες δυναμικές γραμμές μπαίνουν στην επιφάνεια τόσες βγαίνουν από αυτή. Πρέπει να αναφέρουμε επίσης ότι η μαγνητική ροή είναι μονόμετρο μέγεθος.



Η επιφάνεια είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές.
Εικόνα 4.6-49.



Η κάθετη στην επιφάνεια σχηματίζει γωνία α με τις δυναμικές γραμμές.
Εικόνα 4.6-50.

β) Ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή

Όπως είδαμε το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Τώρα θα εξετάσουμε το αντίθετο. Ακριβέστερα θα εξετάσουμε τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης από το μαγνητικό πεδίο.

Το φαινόμενο αυτό ανακαλύφθηκε από τον Άγγλο Faraday και ονομάζεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή ή απλά επαγωγή.

Συνδέουμε τις άκρες ενός πηνίου με ένα γαλβανόμετρο. Αρχικά, βλέπουμε ότι ο δείκτης του οργάνου δεν έχει καμία απόκλιση. Η διαφορά δυναμικού δηλαδή στα άκρα του πηνίου είναι μηδέν.

Στη συνέχεια, παίρνουμε ένα μαγνήτη και τον πλησιάζουμε προς το πηνίο (Εικ. 52). Βλέπουμε τότε ότι ο δείκτης του οργάνου θα έχει κάποια απόκλιση. Στις άκρες του δηλαδή θα υπάρχει κάποια διαφορά δυναμικού η οποία παύει να υπάρχει όταν ακινητοποιήσουμε το μαγνήτη. Αν αναστρέψουμε το μαγνήτη και κάνουμε το ίδιο πείραμα θα παρατηρήσουμε ότι ο δείκτης του οργάνου θα έχει κάποια απόκλιση, αντίθετη όμως από την αρχική. Αυτό δείχνει ότι στα άκρα του πηνίου παρουσιάστηκε πάλι μια διαφορά δυναμικού, με αντίθετη όμως πολικότητα από την προηγούμενη.

Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε ότι όσο πιο γρήγορα μετακινούμε το μαγνήτη μέσα στο πηνίο, τόσο πιο μεγάλη απόκλιση εμφανίζεται στο δείκτη του βολτομέτρου.

Εξήγηση του φαινομένου της επαγωγής

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι:

Η μεταβολή με οποιονδήποτε τρόπο της μαγνητικής ροής που περνά από τις σπείρες ενός πηνίου προκαλεί ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο πηνίο που διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί η μεταβολή της μαγνητικής ροής.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζουμε επαγωγή.

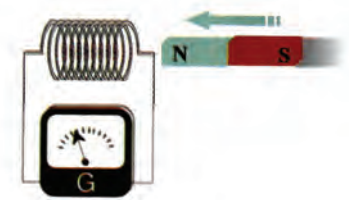
γ) Νόμος επαγωγής (Faraday)

Η επαγωγική τάση είναι μεγαλύτερη όταν στο πηνίο πλησιάσουμε με την ίδια ταχύτητα έναν ισχυρότερο μαγνήτη. Η μεγαλύτερη επαγωγική τάση του πηνίου είναι φανερό ότι οφείλεται στη μεγαλύτερη μεταβολή της μαγνητικής ροής, αφού όλα τα άλλα μεγέθη παραμένουν σταθερά.



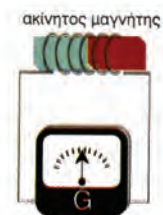
Το γαλβανόμετρο δείχνει ένδειξη μηδέν.

Εικόνα 4.6-51.



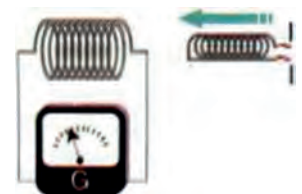
Όταν ο μαγνήτης κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικόνα 4.6-52.



Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος το όργανο δεν δείχνει ένδειξη.

Εικόνα 4.6-53.



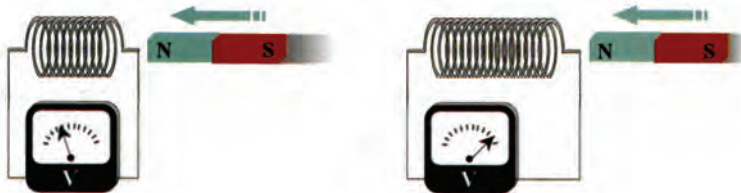
Όσο το ρευματοφόρο σωληνοειδές κινείται το όργανο δείχνει κάποια ένδειξη.

Εικόνα 4.6-54.

Το φαινόμενο της επαγωγής είναι άμεσα συνδεδεμένο με την κίνηση του μαγνήτη. Η κίνηση αυτή προκαλεί μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από τις σπείρες του πηνίου.

Το ίδιο συμβαίνει και όταν πλησιάζουμε ή απομακρύνουμε ένα σωληνοειδές, που όπως ξέρουμε συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης.

Όμως, όπως είδαμε, το φαινόμενο της επαγωγής παρατηρείται ακόμα και αν ακινητοποιήσουμε το σωληνοειδές και μεταβάλουμε την ένταση του ρεύματος. Η μεταβολή, όμως, της έντασης του ρεύματος του σωληνοειδούς προκαλεί μεταβολή της έντασης μαγνητικού του πεδίου και άρα μεταβολή της μαγνητικής ροής που διέρχεται μέσα από αυτό και κατά συνέπεια και μέσα από το πηνίο.



Εικόνα 4.6-55. Μεγαλύτερη ΗΕΔ αναπτύσσεται στο πηνίο με τις περισσότερες σπείρες.

Συνοψίζοντας τώρα τα συμπεράσματα από τα παραπάνω πειράματα παίρνουμε τον ακόλουθο νόμο της επαγωγής (Νόμος Faraday):

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που δημιουργείται σε ένα πηνίο είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi/\Delta t$ και ανάλογη με τον αριθμό N των σπειρών του πηνίου

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N \quad (9)$$

Μονάδα στο SI: $\frac{1\text{Wb}}{\text{s}} = 1\text{V}$.

Η σημασία του αρνητικού προσήμου δικαιολογείται με τον κανόνα Lenz που περιγράφεται πιο κάτω.

δ) Επαγωγικό ρεύμα

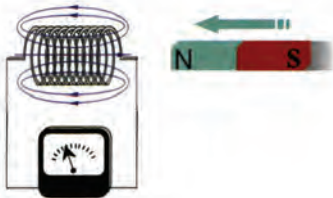
Αν στις άκρες ενός πηνίου συνδέσουμε ένα ευαίσθητο γαλβανόμετρο, θα παρατηρήσουμε ότι η οποιαδήποτε **μεταβολή της ροής** στο πηνίο συνοδεύεται από τη **δημιουργία κάποιου ρεύματος**. Το ρεύμα αυτό ονομάζουμε επαγωγικό ρεύμα και θα διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί και η μεταβολή της ροής.

Η δημιουργία επαγωγικής τάσης είναι αποτέλεσμα της μεταβολής της ροής. Η δημιουργία όμως επαγωγικού ρεύματος προϋποθέτει ότι το κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει η μεταβολή της ροής θα είναι **κλειστό**.

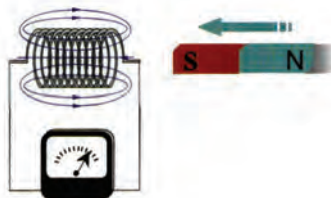
Κανόνας του Lenz

Ο νόμος του Faraday δίνει το μέτρο της ΗΕΔ από επαγωγή, η φορά όμως του επαγωγικού ρεύματος καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz (Heinrich F. Lenz, 1804-1865).

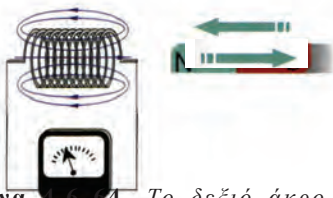
Κάνοντας το παρακάτω πείραμα με τη βοήθεια του γαλβανόμετρου βλέπουμε ότι, όταν ο μαγνήτης πλησιάζει το πηνίο με το βόρειο ή το νότιο πόλο, τότε το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα βόρειος ή νότιος πόλος, ώστε να αντιστέκεται στο πλησίασμα του μαγνήτη, ενώ όταν απομακρύνεται το άκρο του πηνίου γίνεται αντίστοιχα νότιος ή βόρειος πόλος, ώστε να αντιστέκεται στην απομάκρυνση του μαγνήτη.



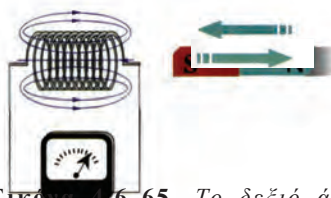
Εικόνα 4.6-62. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.



Εικόνα 4.6-63. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.



Εικόνα 4.6-64. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται νότιος πόλος.



Εικόνα 4.6-65. Το δεξιό άκρο του πηνίου γίνεται βόρειος πόλος.

Μπορούμε με τη βοήθεια των πειραμάτων να διατυπώσουμε τον κανόνα του Lenz:

Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά ώστε το μαγνητικό του πεδίο να αντιτίθεται στο αίτιο που το προκάλεσε.

Είδαμε ότι όταν στη δεξιά άκρη του πηνίου πλησιάζει ο βόρειος πόλος του μαγνήτη (Εικ. 62) τότε το άκρο αυτό συμπεριφέρεται ως βόρειος πόλος. Αν η δεξιά άκρη του πηνίου συμπεριφέρεται ως νότιος πόλος, τότε ο μαγνήτης θα έλκεται από το πηνίο. Με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του μαγνήτη με παράλληλη αύξηση της κινητικής του ενέργειας και αφετέρου μεταφορά ενέργειας από το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη στο πηνίο λόγω δημιουργίας ΗΕΔ σ' αυτό. Δηλ. η αύξηση της κινητικής ενέργειας του μαγνήτη αντιτίθεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας, γιατί τότε θα είχαμε παραγωγή ενέργειας από το μηδέν.

Γι' αυτό, στο δεξιό μέρος του πηνίου δημιουργείται βόρειος μαγνητικός πόλος, ώστε για να πλησιάσει ο μαγνήτης πρέπει να ασκήσουμε σ' αυτόν μια εξωτερική δύναμη το έργο της οποίας εκφράζει την ενέργεια που μεταφέρεται από αυτόν που ασκεί τη δύναμη στο πηνίο.

Ο κανόνας του Lenz είναι αποτέλεσμα της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

Υπολογισμός επαγωγικού ρεύματος

Από το νόμο του Ohm η ένταση του ρεύματος είναι:

$$\text{Αλλά } \left. \begin{array}{l} I = \frac{\varepsilon}{R} \\ \varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \end{array} \right\} I = \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t} \quad (10)$$

Νόμος Neumann

Το ηλεκτρικό φορτίο που μετατοπίζεται από μια διατομή του αγωγού είναι:

$$\text{Αλλά } \left. \begin{array}{l} Q = I\Delta t \\ I = \frac{\Delta\Phi}{R\Delta t} \end{array} \right\} Q = \frac{\Delta\Phi}{R} \quad (11)$$

Από την τελευταία εξίσωση συμπεραίνουμε ότι:

Το ηλεκτρικό φορτίο που μετατοπίζεται σε ορισμένη μεταβολή μαγνητικής ροής είναι ανεξάρτητο από το χρόνο που διαρκεί η μεταβολή αυτή (Νόμος Neumann).